Определение ожидаемой температуры нагрева обмотки электродвигателя при номинальной нагрузке по результатам испытания на холостом ходе.

Rev. 02.   13 September 2025

Испытание на холостом ходе.

Подключите двигатель к номинальному напряжению и трехфазному сбалансированному переменному току, запустите двигатель без нагрузки и измерьте трехфазное напряжение и трехфазный линейный ток. Трехфазный ток должен быть сбалансирован. Если трехфазное напряжение несимметрично, трехфазный ток также будет отличаться. Испытание без нагрузки необходимо проводить более одного часа. Во время испытания следует обращать внимание на изменения тока. Если трехфазный ток несимметричен, это может быть вызвано неодинаковым количеством витков в фазах обмотки или коротким замыканием между витками обмотки. Если небаланс трехфазного тока вызван не одинаковым числом витков в обмотке или ошибкой в соединении или иной причиной, то ток фазы при испытании не будет увеличиваться. Если между витками обмотки короткое замыкание, ток будет возрастать во время испытания, пока обмотка не сгорит. Поэтому, если после начала испытания на холостом ходе ток определенной фазы (или двух фаз) оказывается нестабильным, испытание следует прекратить и проверить обмотки. Короткозамкнутая фаза часто оказывается более горячей, чем две другие фазы обмотки. Во время испытания на холостом ходе проверьте работу двигателя, нет ли повышенного шума, вибрации, проверьте нагрев подшипников, нагрев стального сердечника статора.
Несбалансированный ток холостого хода трех фаз не должен превышать 5% (фактически напряжение фаз не может быть абсолютно равным). Значение тока холостого хода должно находиться в пределах значений показанных в таблице.

Приближенный ток при полной нагрузки и ток холостого хода
трехфазного асинхронного двигателя.

P, квт	ток номинальный, при 2*p*				ток холостого хода, при 2*p*			
	2	4	6	8	2	4	6	8
0,35	0,84	0,97	1,15	–	0,404	0,67	0,83	–
0,6	1,36	1,51	1,83	1,77	0,67	0,86	1,24	1,25
1,0	2,22	2,33	2,62	2,78	0,96	1,2	1,68	1,8
1,7	3,56	3,68	4,25	4,28	1,51	1,77	2,49	2,4
2,8	5,64	5,9	6,54	6,85	1,85	2,62	3,79	3,82
4,5	8,9	9,38	9,97	10,4	3,12	4,08	5,25	5,46
7,0	13,6	14,1	15,1	15,9	4,46	5,45	7,06	8,14
10	18,9	19,6	20,8	21,7	6,25	7,28	8,26	8,6
14	27,1	27,1	29,1	29,5	8,24	9,63	13,1	11,4
20	37,5	38,2	39,6	40,7	9,8	11,8	15,4	14,5
28	52,9	52,4	54,5	56,4	14,7	15,1	17,7	20
40	73,2	75,3	76	–	20,5	19,9	23,4	–
55	101	102	–	–	23,8	27,9	–	–
75	134	–	–	–	32,2	–	–	–

Примечание. Погрешность составляет 15% ниже 2,8 *квт*; погрешность составляет 10% выше 4,5 *квт*; погрешность составляет 5% выше 28 *квт*;

Испытание на повышение температуры.

Повышение температуры двигателя – это значение на которое температура частей двигателя превышает температуру окружающей среды, когда температура каждой части двигателя достигает стабильности, то есть температура больше не повышается в нормальных условиях эксплуатации. Поэтому повышение температуры двигателя необходимо измерять при полной нагрузке. От начала работы до стабилизации температуры двигателя проходит несколько часов.

Для проведения испытания при полной нагрузке двигатель должен выдерживать номинальную нагрузку. Обычно в качестве нагрузки используется генератор, который затормаживается за счет регулирования сопротивления нагрузки присоединенного генератора к валу двигателя. Методы измерения повышения температуры обычно включают метод термометра и метод сопротивления. В целях экономии энергопотребления превышение температуры также можно измерять без нагрузки.

1. Метод термометра. В этом методе используется термометр для непосредственного измерения повышения температуры двигателя. Запустите двигатель и отрегулируйте нагрузку так, чтобы линейный ток двигателя был равен номинальному току. В это время двигатель работает в номинальном режиме. Используйте термометр для измерения температуры каждой части двигателя, температура двигателя продолжает расти во время работы. Через несколько часов температура достигает определенного стабильного значения и перестает увеличиваться. Разница между этой температурой и температурой окружающей среды это и есть повышение температуры двигателя. Но здесь следует отметить, что, поскольку измеренная температура представляет собой температуру всей поверхности, которая примерно на 10°C ниже, чем предполагаемое место самой высокой температуры внутри обмотки, поэтому к измеренной температуре следует добавить 10°C, чтобы получить фактическое повышение температуры двигателя. Термометр, используемый для измерения повышения температуры, должен быть спиртовым, а не ртутным, поскольку в двигателе имеется магнитное поле рассеяния, и под действием этого переменного магнитного поля в ртути будут возникать вихревые токи и выделяться тепло, что влияет на точность измерений.
При использовании термометра стеклянный шарик термометра должен находиться близко к катушке обмотки. Для обеспечения плотного контакта можно использовать алюминиевую фольгу. Плотно оберните стеклянный шарик термометра, затем приклейте его к катушке, затем обмотайте ватой. Марлевая лента плотно завязывается, чтобы предотвратить влияние потока воздуха. Чтобы обеспечить точность измерений, мы должны устраните все факторы, которые могут повлиять на температуру. Для закрытых двигателей невозможно использовать для измерения термометр прикрепляемый непосредственно к катушке. При использовании современных приборов с проволочной термопарой удается доступ к катушкам обмотки, соблюдая меры электробезопасности.

2. Метод сопротивления. Этот метод использует увеличение сопротивления проводника при повышении температуры. По изменению сопротивления в холодном и горячем состоянии можно рассчитать среднее повышение температуры. Перед началом испытания измерьте сопротивление фазы R_1 и запишите температуру катушки в °C. Затем запустите двигатель и дайте ему поработать в номинальных условиях. Измеряйте сопротивление каждые определенные промежутки времени (например, через полчаса). Когда сопротивление фазы перестает увеличиваться (значение сопротивления измеренное дважды остается неизменным), запишите сопротивление фазы в горячем состоянии как R_2 (измерение необходимо завершить в течение полминуты после отключения питания). Превышение температуры катушки составляет:

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (235 + t)$$

Если начальная температура обмотки не равна температуре окружающей среды, в уравнение подставляется температура среды t_0:

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (235 + t) + t - t_0$$

R_1 – сопротивление в холодном состоянии, *Ом*. R_2 – сопротивление в горячем состоянии, *Ом*, 235 – постоянный коэффициент для меди, для алюминевой обмотки цифру в уравнениях следует заменить на 245, t – температура обмотки в начале измерения, t_0 – температура окружающей среды, °С. Метод сопротивления позволяет рассчитать только повышение температуры обмотки (средняя температура обмотки), что примерно на 5 – 10°С ниже, чем самая горячая точка обмотки.

3. Метод измерения при холостом ходе для подсчета повышения температуры обмотки при номинальной нагрузке. Приведенный подсчет применим к асинхронным электродвигателям общепромышленного исполнения закрытого или защищенного исполнения.

При использовании метода сопротивления для измерения повышения температуры обмотки двигатель должен работать при полной нагрузке, что требует определенного оборудования и потребляет больше энергии. Для небольших закрытых асинхронных двигателей сначала можно измерить повышение температуры на холостом ходе, а затем рассчитать повышение температуры при полной нагрузке. Этот метод прост требует только работы без нагрузки, экономит электроэнергию, результаты измерений более точны.
Перед началом испытания измерьте холодное сопротивление обмотки R_1 и t – холодную температуру обмотки. Затем включите двигатель и запустите его без нагрузки, измеряйте температуру окружающей среды и сопротивление обмотки каждые полчаса и записывайте ток холостого хода. Когда дважды измеренное сопротивление остается неизменным или незначительно изменяется – это сопротивление горячей обмотки R_2 (измерение необходимо завершить в течение полминуты после отключения электроэнергии). Затем рассчитайте повышение температуры без нагрузки по следующей формуле:

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (235 + t) + t - t_0$$

В формуле: R_1 – начальное, холодное сопротивление обмотки, *Ом*, R_2 – горячее сопротивление обмотки, *Ом*, t – начальная температура обмотки, °С, t_0 – температура окружающей среды во время испытания, принимают среднее значение за три измерения.
(возможно принять начальную температуру обмотки t равной температуре окружающей среды t_0).

Затем используйте уравнение для расчета повышения температуры при полной нагрузке:

$$T = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \times A \times C}}{2 \times A} \times \left(\frac{I}{I_0}\right)^2 + \Delta t - \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \times A \times C}}{2 \times A}$$

где A и C:

$$A = \frac{6{,}75 \times \frac{I}{I_0}}{\Delta t \times \left(\frac{I}{I_0}\right)^3 + \left(9 \times \Delta t \times \frac{I}{I_0} + 235 + t_0\right) - 2 \times \Delta t \times \left(\frac{I}{I_0}\right)^2}$$

$$C = \frac{1{,}15 \times (235 + t_0) \times \Delta t}{\Delta t \times \left(\frac{I}{I_0}\right)^3 + \left(9 \times \Delta t \times \frac{I}{I_0} + 235 + t_0\right) - 2 \times \Delta t \times \left(\frac{I}{I_0}\right)^2}$$

где: I – ток полной нагрузки, принимается по паспорту двигателя, из справочных данных; I_0 – ток холостого хода, принимается среднее значение за три измерения, t_0 – температура окружающей среды во время испытания двигателя на холостом ходе, Δt – разница между температурой в начале и в конце испытания на холостом ходе полученной подсчетом методом измерения сопротивления обмотки.

Пример. Двигатель 55 *квт*, четыре полюса, номинальный ток двигателя I = 102 ампер. Ток холостого хода полученный при испытании I_0 = 29,7 ампер. Температура окружающей среды t_0 = 25°C, температура обмотки в начале испытания: 25°C, в конце, когда температура обмотки перестала повышаться (наибольшее значение): 55°C. Разница Δt = 55 – 25 = 30°C. Найдем коэффициенты подставляемые в уравнение:

$$A = \frac{6{,}75 \times \frac{102}{27{,}9}}{30 \times \left(\frac{102}{27{,}9}\right)^3 + \left(9 \times 30 \times \frac{102}{27{,}9} + 235 + 25\right) - 2 \times 30 \times \left(\frac{102}{27{,}9}\right)^2} = \frac{24{,}677}{2009{,}863} = 0{,}01227$$

$$C = \frac{1{,}15 \times (235 + 25) \times 30}{30 \times \left(\frac{102}{27{,}9}\right)^3 + \left(9 \times 30 \times \left(\frac{102}{27{,}9}\right) + 235 + 25\right) - 2 \times 30 \times \left(\frac{102}{27{,}9}\right)^2} = \frac{9142{,}5}{2009{,}863} = 4{,}548$$

Обратите внимание, в этих формулах подсчет знаменателя одинаков. Ожидаемое превышение температуры обмотки при номинальной нагрузке составит:

$$T = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \times 0{,}01227 \times 4{,}548}}{2 \times 0{,}01227} \times \left(\frac{102}{27{,}9}\right)^2 + 30 - \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \times 0{,}01227 \times 4{,}548}}{2 \times 0{,}01227} = 89{,}78\ °C$$

Здесь также в левой и правой части уравнения подсчет одинаков, что несколько упрощает расчет. Напомним также правило, в начале подсчитываются значения возведением в квадрат, в куб, затем произведения (умножение) значений, затем – вычитание, сложение. Полученное значение является превышением температуры над температурой окружающей среды, то есть необходимо прибавить значение температуры окружающей среды.

Обычно расчетная температура при эксплуатации общепромышленных электродвигателей, не специального исполнения конструкции, принимается 40°C. Таким образом ожидаемая температура обмотки 89,78 + 40 ≈ 130°C, что не превышает для класса изоляции F (155°C). Если, предположим эксплуатация электродвигателя будет при 25°C, как при испытании, то ожидаемая температура 89,78 + 25 ≈ 115°C. Для обмотки из алюминиевого провода в уравнениях цифра 235 заменяется на 245. Максимально допустимое превышение температуры каждой части трехфазного асинхронного двигателя при температуре окружающей среды 40°C указано в таблице 2.

Таблица 2. Максимально допустимое превышение температуры трехфазного асинхронного двигателя (температура окружающей среды принимается 40°C).

часть электродвигателя	класс изоляции									
	A (105°C)		E (120°C)		B (130°C)		F (155°C)		H (180°C)	
	максимально допустимое превышение температуры °C									
метод измерения	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C
катушка статора	55	60	65	75	70	80	85	100	105	125
катушка ротора	55	60	65	75	70	80	85	100	105	125
сердечник статора	60	–	75	–	80	–	100	–	125	–
кольцо ротора	60	–	70	–	80	–	90	–	100	–
подшипник скольжения	40	–	40	–	40	–	40	–	40	–
подшипник качения	55	–	55	–	55	–	55	–	55	–

метод измерения: T – термометром, C – пересчетом сопротивления.

Указание превышения связано с разной возможной температурой окружающей среды. Так например электродвигатель может быть размещен в холодном климате или наоборот в тропическом, в производственном помещении где всегда тепло или на открытом воздухе. В любом случае температура, прямо измеренная или подсчитанная по сопротивлению, не должна превышать соответствие классу нагревостойкости. Например, по таблице для класса F (155°C), при температуре катушки статора: 100 + 40 = 140°C, добавление в 10 – 15 градусов предполагает наиболее горячее место катушки (140 + 15 = 155).

В справочниках данных обмоток не редко указывается сопротивление фазы постоянному току при определенной температуре, значение сопротивления используется для контроля качества обмотки. Для приведения сопротивления к значению при указанной температуре используется ниже показанное уравнение.
В зависимости от мощности двигателя сопротивление подразделяется на высокоомное и низкоомное: сопротивление выше 100 *Ом* – высокое сопротивление, сопротивление ниже 100 *Ом* – низкое сопротивление. Высокое сопротивление можно измерить мультиметром или подключив постоянный ток, измерить ток и напряжение, затем рассчитать сопротивление постоянному току по закону Ома. Для измерения низкого сопротивления необходимо использовать мост с магазином сопротивлений для более высокой точностью. Значение сопротивления следует измерить три раза и взять среднее значение. Контакт с выводами обмотки должен быть хорошим во время измерения, сопротивление контакта имеет большое влияние при измерении низкого сопротивления. Сопротивление каждой фазы следует измерять одним и тем же прибором. При измерении сопротивления следует измерить температуру обмотки, а затем при необходимости преобразовать ее в стандартное значение сопротивления при 15°C (или 20°C):

$$R_{15} = \frac{Rt}{1 + \alpha \times (t + 15)}$$

R_{15} – сопротивление обмотки при 15°C (или 20°C), Rt – сопротивление обмотки при t – температура обмотки при измерении сопротивления, α – температурный коэффициент проводника: медь 0,004, алюминий 0,00385. Заменив 15 на 20 соответственно приводят значение к этой температуре.

По материалам:

"Ремонт трехфазного асинхронного двигателя", 1975, стр. 212.
Шанхайское народное издательство №5, Шаосин–роуд, Шанхай.
Сун Цзячэн, Ли Сянсинь, Хао Цзянь, "Перемотка и модификация обмоток двигателя", 2009, стр. 276. Пекин, China Electric Power Press